

CONSIDERACIONES SOBRE LA GÉNESIS DE LAS ZEOLITAS NATURALES DEL SURESTE DE ESPAÑA

Jorge Luis Costafreda Mustelier⁽¹⁾, Domingo Alfonso Martín Sánchez⁽¹⁾ y Benjamín Calvo Pérez⁽¹⁾

⁽¹⁾Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Departamento de Ingeniería Geológica. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid. (costafreda@yahoo.es); (domingoalfonso.martin@upm.es) y (benjamin.calvo.perez@gmail.com).

RESUMEN

Desde hace poco menos de una década fue descubierto y estudiado por primera vez el único yacimiento de zeolita con interés industrial conocido en España, ubicado en el complejo volcánico neógeno del sureste de la península ibérica. En las investigaciones realizadas en la zona de Cabo de Gata, se mencionan las zeolitas como minerales de neoformación con abundancia limitada, acompañando a otras especies minerales más abundantes, fundamentalmente esmectitas, que forman parte de la composición de los principales yacimientos de bentonitas que se explotan en esa parte del territorio español.

El estudio de la constitución geológica y la génesis del yacimiento de zeolita que presentamos en este trabajo, demuestra que la abundancia de la zeolita supera el 90% con relación a las arcillas, el yeso y el cuarzo y otros compuestos en los sitios de mayor concentración industrial.

ABSTRACT

Since a few less of a decade the only one zeolite deposit with industrial interest known in Spain, and settled in volcanic neogene area at the South-East of Iberian Peninsula, was discovered and researched for the first time. In all these researches made in Cabo de Gata, zeolites are mentioned as unusual neoformation of minerals, together with more common minerals, mainly smectites, as a part of the mainly bentonites deposits, which are exploited in that Spanish zone.

The study of geologic formation and the genesis of zeolite deposit, which is presented in this paper, demonstrate that the zeolite abundance is up to 90 %, related to the clay, gypsum, quartz and other compounds, in the places with most industrial concentration.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de investigación efectuados en el área central de la caldera de los Frailes ha permitido aumentar el conocimiento geológico del yacimiento de zeolita San José Los Escullos. Las primeras conclusiones establecieron la presencia de mordenita asociada a esmectitas y a pequeñas cantidades de feldespatos, cuarzo, pirita y trazas de yeso (Calvo, B., Costafreda, J.L y Estévez, E., 2005) en un ambiente geológico constituido por dacitas, andesitas piroxénicas, tobas dacíticas e ignimbritas, conglobrechas, lapilli y aglomerados con cemento tobáceo (Costafreda, J.L., 2008). La mineralización zeolítica es de origen hidrotermal en régimen moderado de presión y temperatura.

Otros estudios posteriores señalan la eficacia de estas zeolitas como puzolanas, apropiadas para la fabricación de cementos puzolánicos.

La existencia de cuatro calderas volcánicas conocidas en la zona del Cabo de Gata: Los Frailes, Rodalquilar, El Cinto y Lomilla de Las Palas (Arribas, A. 1992; Castroviejo, R. 1999), constituidas por un basamento dacítico intruído y sobreyacido por domos superpuestos de dacitas, andesitas piroxénicas, andesitas hornbléndicas, riolitas y material volcanosedimentario (lapilli, tobas, ignimbritas, pómez, etc.), así como la existencia de extensas áreas de alteración hidrotermal, ponen de manifiesto la presencia de numerosos índices directos para la posible localización de nuevos yacimientos de zeolitas en el área (Costafreda, J.L., 2008).

UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia de Almería, entre las localidades de Rodalquilar, Los Escullos y San José de Níjar, aproximadamente a 4 kilómetros al Noreste de éste último, siguiendo la línea de la costa. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas 2° 4' 08" de Longitud Oeste, y a los 36° 46' 42" de Latitud Norte (ver figura 1).



Figura Nº 1: Yacimiento San José-Los Escullos. Vista desde el flanco suroriental (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

CONSTITUCIÓN GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO

Las características generales de las rocas volcánicas de la zona fueron establecidas por Fúster, J. M. *et al.* (1965), Loder, W. (1966) y Sánchez, V. (1968). Posteriormente, los materiales volcánicos han sido descritos en detalle por Bordet, P. (1985), Fernández Soler, J. M. (1987, 1992), Cunningham, C. G. *et al.* (1990) y Rytuba, J. J. *et al.* (1990). Las descripciones más completas y detalladas fueron las del Instituto Geológico y Minero de España (Carta Magna IGME, 1983) y las de Arribas, A. (1992).

Los trabajos que se describen en esta comunicación pusieron de manifiesto, de forma detallada, el carácter de la mineralización zeolítica y de sus rocas encajantes; de acuerdo con los datos obtenidos se tiene que las principales rocas relacionadas con la mineralización zeolítica son las siguientes: tobas dacíticas (yacen hacia los flancos oriental y meridional), piroclastos de composición andesítica (ocupan el extremo occidental y parte del extremo norte), andesitas piroxénicas (predominan hacia el flanco más occidental), brechas piroclásticas de composición dacítica (yacen en la porción extrema oriental del yacimiento) y bentonitas en pequeños afloramientos (ver figura 2).

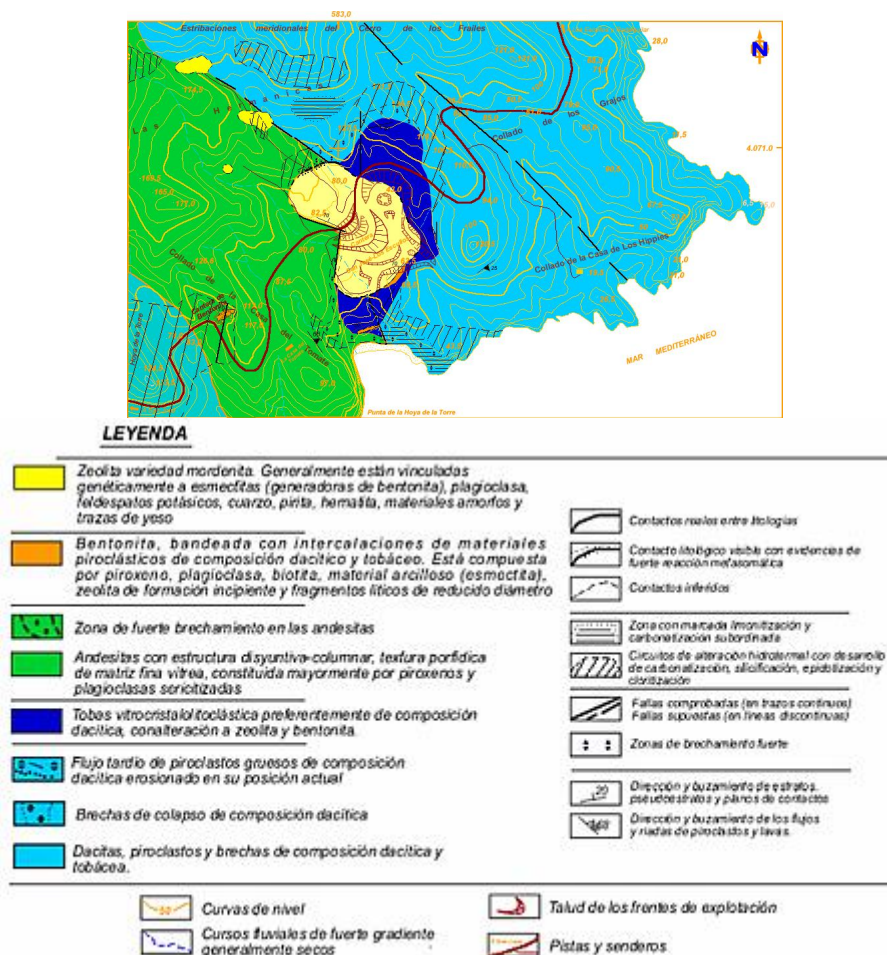


Figura N° 2: Mapa geológico y leyenda del área de estudios escala 1:10.000 (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Andesitas

Estas rocas forman grandes afloramientos en la parte occidental del área de estudio, que llegan a alcanzar los 80-100 metros (ver figura 3 a). Poseen color gris oscuro que llegan hasta gris claro, cubiertas con frecuencia con pátinas de óxidos de hierro y manganeso; la estructura predominante es la disyuntiva-columnar que ocasionalmente pasa a ser masiva y ligeramente brechosa.

Desde el punto de vista estructural, el rumbo de los planos de disyunción es N 60° E, donde un sistema de diaclasas con rumbo N40°O, corta dichos planos en forma normal, afectando toda la formación. Las intersecciones de estas diaclasas ha provocado la formación de bloques de distintos tamaños.

Microscópicamente, presentan textura porfídica, constituida por fenocristales de plagioclasas fuertemente sericitizadas y piroxenos parcialmente reabsorbidos en una matriz microlítica, microporfídica, hemivítrea y afanítica, originándose en sus aristas golfos de reacción y aureolas de alteración. El hábito de los cristales es xenomórfico-hipidiomórfico, muchos de los cuales acusan contornos dentados bien definidos (ver figura 3 b). En la composición de esta roca entran también minerales opacos y de alteración secundaria, tales como magnetita, titanomagnetita, pirita y sericita que no suelen sobrepasar el 5% de abundancia en la composición modal.

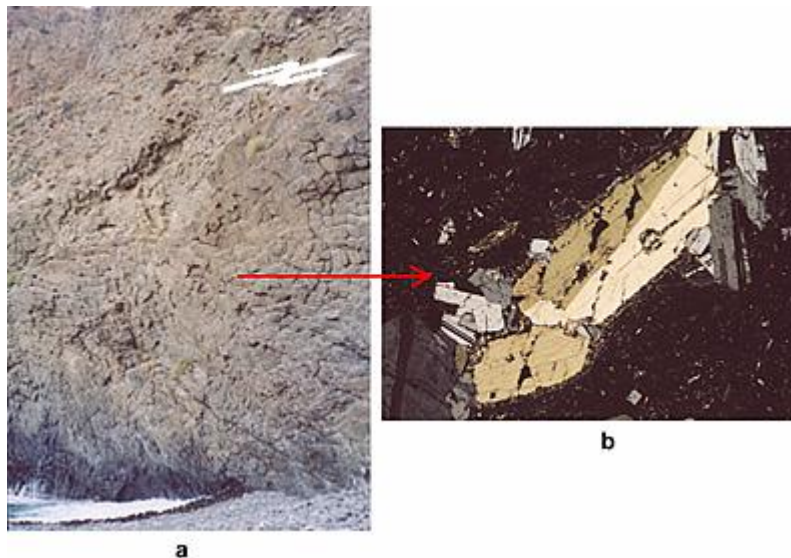


Figura N° 3: a) Andesitas piroxénicas con disyunción columnar en el flanco sur del yacimiento San José-Los Escullos; b) Microfotografía de sección delgada de una muestra de andesita piroxénica (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

En sus contactos con las rocas zeolíticas se acusa una fuerte alteración metasomática a lo largo de franjas de cataclasitas y milonitas, con la correspondiente sustitución pseudomórfica de piroxenos y plagioclasas por zeolita, a través de los planos de los cruceros, provocando la aparición de bandas concéntricas zonales de mordenita dentro de fenocristales de plagioclasas. La presencia de una matriz muy fina en la andesita, cerca de su contacto con las rocas zeolíticas, indica una reacción térmica con desarrollo de fases de borde.

Contactan con las rocas zeolíticas y las tobas dacíticas por los flancos Norte y occidental del yacimiento.

La edad de las andesitas es de 8,0 millones de años, según las dataciones de K/Ar (Arribas, *et al.* 1992).

Tobas dacíticas

Las investigaciones realizadas demuestran que estas rocas son tobas vitrocrystalolitoclásticas, en ocasiones ignimbríticas y cineríticas, de composición dacítica. Se encuentran fuertemente alteradas a zeolita y bentonita en los flancos oriental y meridional del yacimiento; aunque las gradaciones de estas alteraciones no son observables a simple vista pudo detectarse por medio de los ensayos de difracción y fluorescencia de rayos x (ver figura 4 a).

Son de color blanco que puede llegar a gris claro, llegando a ser poco densas, incluso porosas, friables. Por lo general, suelen poseer bandeamientos bien definidos, y forman grandes escamas que se desplazan una sobre otras a través de planos de deslizamientos subhorizontales con inclinación 26° hacia el Oeste.

Están constituidas por vidrio, cuarzo, piroxeno, plagioclasa, biotita, epidota y fragmentos de rocas, con texturas variables del tipo vitrocrystalolitoclástica, bandeada, cinerítica y tufítica. La matriz es muy fina, vítrea y desvitrificada, muchas veces predomina un cemento de cinerita que engloba cristales recocidos, hinchados, aplastados, torcidos, rotos, corroídos y pulverizados. Los fenocristales relictos han sido sustituidos isomórficamente por material secundario de naturaleza bentonítica y zeolítica, emplazándose a través de las líneas de los cruceros, microfracturas, y como sustitución pseudomórfica del vidrio volcánico (ver figura 4 b).

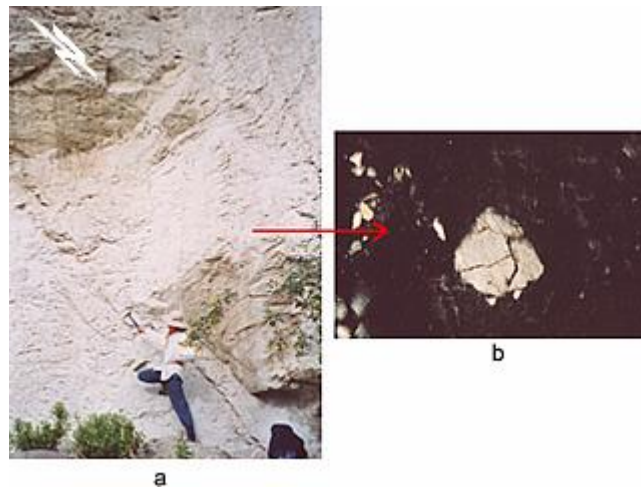


Figura N° 4: a) Afloramiento de tobas dacíticas en el yacimiento San José-Los Escullos; b) microfotografía de sección delgada de la muestra SJPET-19 tomada en este punto. (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Sus contactos con las andesitas, por el norte, y con los piroclastos y brechas de composición dacítica por el Oeste, son muy claros y ocasionalmente exhiben rasgos de alteración hidrotermal moderada (ver figura 5).



Figura N° 5: Zona de contacto metasomático entre andesitas y tobas dacíticas en la parte Norte del yacimiento San José-Los Escullos. (Fuente: Costafreda, J.L, 2008).

La yacencia medida en el contacto de las dacitas con los piroclastos de composición dacítica y sus tobas suelen ser N44°O, con buzamiento de 73° al Sureste, y N86°E con buzamiento 81° hacia el Sur.

Bentonitas

Los afloramientos más representativos ocupan un área reducida en los flancos sur y occidental del yacimiento. El mejor afloramiento tiene forma de escama vertical de unos 40 metros de largo por 10 metros de ancho, que se extiende en dirección noreste-suroeste, y es objeto de explotación actualmente (ver figura 6).



Figura N° 6: Afloramiento de bentonita en primer plano, en el Flanco sur del yacimiento San José-Los Escullos (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

La composición química de las bentonitas estudiadas es: 51,29-34,31% de SiO_2 ; 13,13-13,73% de Al_2O_3 ; 2,43-7,67% de MgO ; 1,40-2,75% de Fe_2O_3 ; 0,97-1,11% de CaO ; 0,99-3,10% de Na_2O y 0,53-2,20% de K_2O . Las esmectitas detectadas tienen una abundancia entre 63,71-100%; son expansivas, y su hinchamiento varía entre los 14,99 Å y los 15,74 Å en estado natural. En estas muestras la presencia de mordenita se limita a un 4,0-20,58% (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L., 2010).

Las estructuras típicas son estratificadas y bandeadas, marcadas por la erosión esferoidal y huellas de desecación. Poseen un fuerte aspecto esponjoso y friable y contienen intercalaciones de materiales piroclásticos, de composición dacítica y tobácea. Los afloramientos están cortados por diaclasas verticales y subverticales con inclinación de 70°-80° hacia el Oeste.

Presentan textura cristalolitoclástica, piroclástica y orientada, y están compuestos por esmectita y mordenita como minerales mayoritarios, así como cuarzo, plagioclasa biotita, caolinita y fragmentos líticos poligénicos (ver figura 6).

Las bentonitas se encuentran en contacto tectónico con estrechos afloramientos de tobas dacíticas en el flanco Sur del yacimiento San José-Los Escullos, y con piroclastos de composición dacítica con cemento tobáceo. La dirección del contacto es de N70°E (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L., 2010).

Rocas zeolíticas

Forman grandes afloramientos en la parte norte, norte-noroeste y en la parte central del yacimiento. Ofrecen coloraciones blanca, beige, azul pálida y gris claro. Se encuentran cruzadas por diaclasas verticales y subverticales. Los planos de fallas, que afectan a los principales afloramientos, tienen rumbo N80°O e inclinación de 55° hacia el Sur, en el flanco occidental del yacimiento (ver figura 7a).

Los análisis de difracción de rayos x (DRX), fluorescencia de rayos x (FRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), detectaron la presencia mayoritaria de mordenita acompañada de esmectita y fases minoritarias de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, pirita, hematita, materiales amorfos y trazas de yeso (Calvo, B., Costafreda, J. L. y Estévez, E. 2005). La zeolita se emplaza en los espacios que ocupaban los minerales preexistentes, sustituidos pseudo e isomórficamente por las disoluciones hidrotermales (Costafreda, J.L., 2008) (ver figura 7 b).

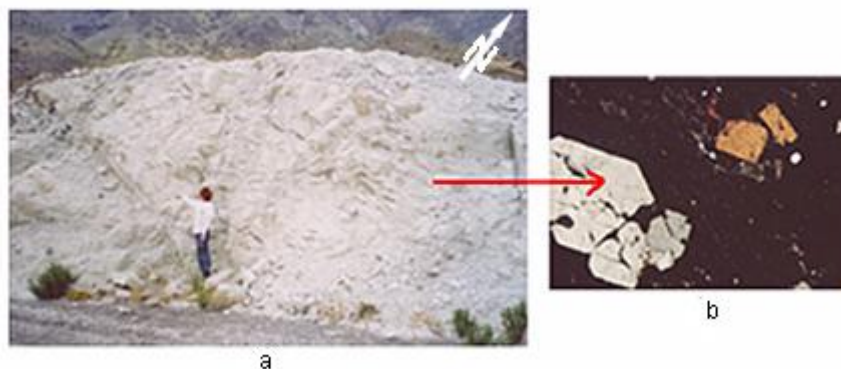


Figura N° 7: a) Afloramiento de zeolita natural en el flanco septentrional del yacimiento; b) microfotografía de una muestra de zeolita con nicoles cruzados, mostrando, en primer plano, un cristal de anfíbol totalmente zeolitizado (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Microscópicamente, la mordenita aparece en forma de cristales alargados, fibrosos y tabulares, alineados paralelamente o como haces, entrecrecidos con cristales anhedros, y en ocasiones euhedrales, de esmectitas.

Los únicos contactos claros de las rocas zeolíticas con sus encajantes se localizan en la parte noroeste del yacimiento, y en un punto alejado hacia la porción más septentrional. La posición de los afloramientos de zeolita indica que la misma parece haberse formado a partir de procesos metasomáticos de contacto, provocados por la irrupción de soluciones calientes a través de planos de fallas que se interceptan entre sí en la parte central del yacimiento, y que afectaron sectores porosos restringidos constituidos por tobas vítreas e ignimbritas de composición dacítica, que yacen entre las andesitas piroxénicas y domos de dacita (Costafreda, J.L., 2008).

Los contactos están marcados, frecuentemente, por aureolas de reacción intensa, aunque en la posición actual están fuertemente tectonizados; es posible que después de la actividad hidrotermal la tectónica continuó movilizandolos, ubicándolos en posición parautoctona respecto a su yacencia original, manteniéndose, no obstante, los restos de contactos metasomáticos (ver figura 8 a y b).

La fuerte trituración da testimonio de la porosidad del entorno, que favoreció la circulación de los fluidos hidrotermales, pero también es un indicio infalible de la acción de la tectónica, favoreciendo la formación de fallas y sectores brechosos preexistentes en dichas formaciones.



Figura N° 8: Zonas de contacto activo entre las rocas zeolíticas y las andesitas piroxénicas en la parte noroccidental del yacimiento San José-Los Escullos. Nótese la fuerte alteración de las andesitas y la asimilación parcial a que han sido sometidas. En a) la sustitución se lleva a cabo a través del plano de falla; en b) la sustitución es total, por medio de una difusión generalizada (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

En la figura 9 se observa un plano de falla con yacencia N58°O y buzamiento de 70° al Noreste, que pone en contacto a las andesitas con las rocas zeolíticas. En este punto las andesitas se encuentran fuertemente alteradas, parcial y/o totalmente sustituidas por zeolita y bentonita, y son

atravesadas por vetas que se inclinan suavemente al noroeste. Las vetas están rellenas de sulfuros oxidados, que alternan con franjas limonitizadas de hasta 2 metros de ancho, cortadas, a su vez, por abundantes vetas rellenas de sulfuros y carbonatos. Junto a estas se describe una zona de propilitas de color gris verdoso, foliadas y cruzadas por vetas rellenas de material carbonatado con ancho entre 2-10 cm. El espesor de esta zona alcanza los 3 metros.



Figura N° 9: Plano de falla que ha servido de conducto a las disoluciones formadoras de zeolita y bentonita, en la parte noroeste del yacimiento San José-Los Escullos (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Hacia la periferia, continúa una zona de andesitas brechosas, alteradas hidrotermalmente (ver figura 10).

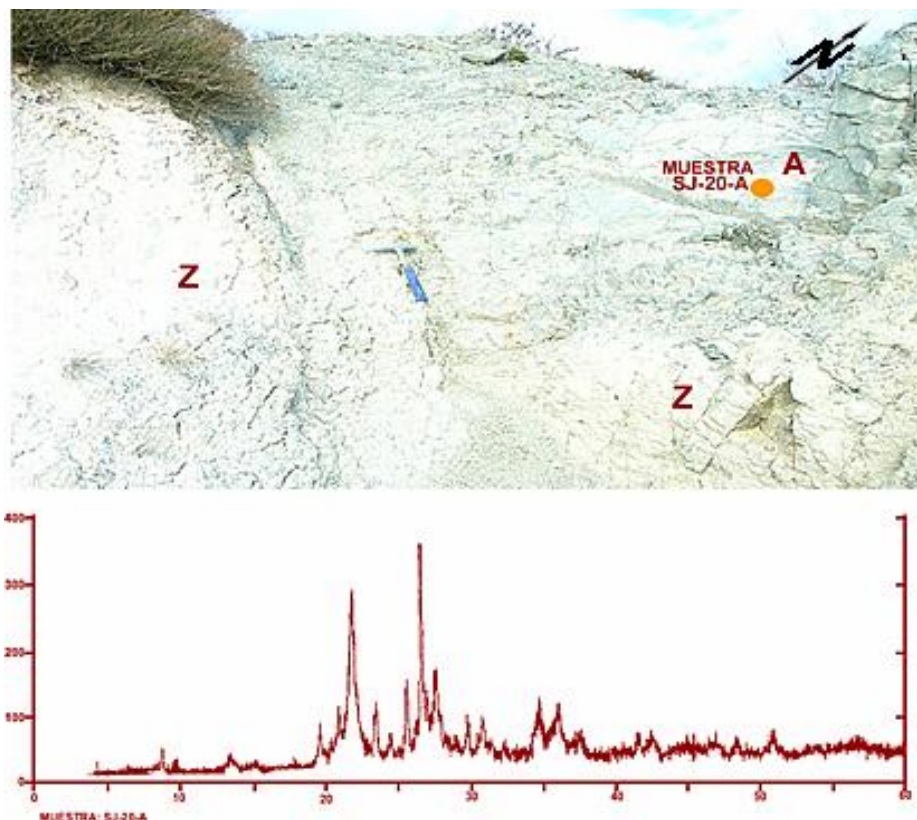


Figura N° 10: En la parte superior: afloramiento de zeolita, donde se observa la fuerte alteración metasomática sufrida por la andesita piroxénica (A), reemplazada por mineralización secundaria de zeolita (Z) en el yacente de la falla descrita en la figura 7. En la parte inferior: derivatograma de la muestra SJ-20-A tomada en este punto, donde se muestran las fases mineralógicas siguientes: mordenita, esmectita, cuarzo, feldespato y moscovita (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

En el entorno hay una fuerte carbonatación acompañada de oxidación intensa y milonitización. Las vetas rellenas de carbonatos y sulfuros se entrecruzan en forma de stock works.

Dacitas, piroclastos y brechas de composición dacítica y tobácea

Las dacitas coexisten indistintamente con flujos piroclásticos, brechas de dacitas y sus tobas. Las dacitas se presentan como rocas de gran densidad, aunque tienden a formar, con mucha frecuencia, bloques, megabloques y brechas de tamaños variables (ver figura 11 a). Muchas veces se encuentran clarificadas por efecto de alteración propilítica regional y, frecuentemente, se encuentra atravesada por vetas rellenas de material carbonatado residual. En ocasiones se presentan localmente lixiviadas.

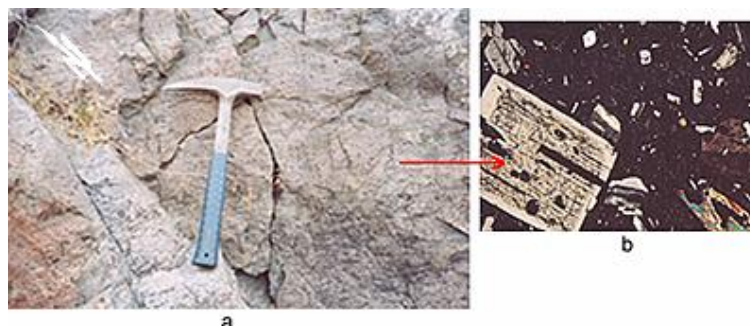


Figura N° 11: a) Afloramiento de dacita en el extremo Sureste del yacimiento San José –Los Escullos, y b) microfotografía de una muestra tomada en este afloramiento utilizando nicoles cruzados (Fuente: Costafreda, J.L.).

La estructura, de forma general, es brechosa, bandeada y foliada. Los fragmentos poseen orientación que indican movimiento del flujo piroclástico y se encuentran unidos por un cemento de composición dacítica y tobácea de granos finos. El diámetro de los bloques oscila entre 4-30 cm, mientras que el de las partículas cementantes varía entre 0,4- 0,2 cm.

El estilo de yacencia de las dacitas, en el área de estudio, produce formas topográficas a modo de domos más o menos bien preservados, que muchas veces contactan lateralmente con brechas de colapso.

Microscópicamente, poseen textura porfídica, inequigranular, granular-xenomórfica a granular-hipidiomórfica. Están constituidas por plagioclasa (40%) y anfíbol hornblenda (30%) y de forma subordinada por piroxeno, vidrio, con muy escaso cuarzo, el cual, generalmente, está ausente en estas rocas. La matriz es microlítica, vítrea y hemivítrea muy fina. Los fenocristales de plagioclasa se encuentran alterados a sericita; por su parte, los anfíboles reaccionan fuertemente con la matriz (ver figura 11 b).

Los materiales opacos están representados por magnetita y titanomagnetita, con hábitos xenomórficos, generalmente con poca abundancia.

Arribas, A. (1992) describe la presencia de dacitas en forma de domos que rellenan el espacio interior de la caldera de Los Frailes, acompañadas por sedimentos marinos, tobas soldadas y coladas de lavas. La descripción microscópica de las dacitas, según este autor, indica la presencia de hornblenda, plagioclasa y biotita, sin mucho cuarzo visible, con una matriz microlítica y vítrea, donde los fenocristales de anfíbol y plagioclasa presentan inclusiones poiquilíticas de vidrio. Esta descripción coincide con las efectuadas sobre las muestras petrográficas que se describen en el presente trabajo.

La edad de las dacitas es de $14,4 \pm 0,8$ Ma y $12,2 \pm 0,5$ Ma (Arribas, A. *et al.* 1992).

Los piroclastos y brechas son de composición dacítica y tobácea; se encuentran ocupando las partes meridional, oriental y septentrional del yacimiento; forman flujos, mantos y riadas que se solidificaron a ciertas distancias de los centros volcánicos principales, debiendo su movilidad a la

fuerza de gravedad, la viscosidad y la presión interna de la lava. Tienden a superponerse unos sobre otros evidenciando el carácter cíclico de las emisiones volcánicas en la caldera de Los Frailes (ver figura 12).



Figura N° 12: Afloramiento de piroclastos de composición dacítica cementados por material tobáceo en el flanco sur del yacimiento (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

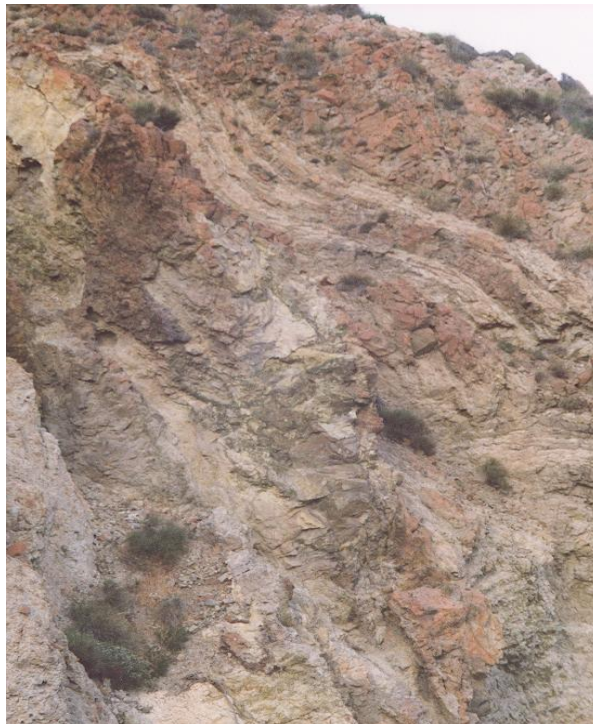


Figura N° 13: Riadas de piroclastos de composición dacítica y tobácea orientadas en dirección al fondo de la caldera de Los Frailes. Nótese los grandes bloques líticos subredondeados sobreyacidos por coladas piroclásticas más jóvenes sobre delgadas secuencias de tobas finas (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

En los afloramientos, se distinguen por sus colores gris claro a oscuro, pardo rojizo, violáceo, hasta gris oscuro. Generalmente son bloques y megabloques subangulosos, subredondeados y redondeados que alcanzan tamaños entre < 4 cm hasta 20 metros de diámetros, todos ellos cementados por un material de menor granulometría, pero de igual composición dacítica, y por productos alterados de naturaleza tobácea. En la parte sur del área de estudio forman pseudoestratos por deposición cíclica, con superposición de bandas piroclásticas que engloban megabloques de hasta 20 metros de diámetro, subredondeados y 'rotados' que son sobreyacidos por tobas finas bien estratificadas y sobrecorridas por mantos más jóvenes de piroclastos tardíos (ver figura 13).

Microscópicamente, muestran bandas granulares finas que alternan con secciones gruesas. Las bandas granulares finas están constituidas por anfíboles rotos y microlitos diminutos de éstos, formando bandeamientos de colores verde oscuro, pardo claro y gris oscuro. Las bandas gruesas están constituidas por vidrio alterado.

Las brechas piroclásticas se originaron cuando la parte superficial de la corriente de lava se solidificó, rompiéndose la costra por el movimiento del flujo interior y formando bloques de diferentes diámetros y formas. Estos materiales suelen alternarse con capas de tobas debido a que durante las explosiones se verificaron emisiones cíclicas de piroclastos seguidas de cenizas.

Arribas, A. (1992) atribuye la formación de los piroclastos de composición dacítica al desprendimiento de fragmentos de los caparzones de los domos dacíticos en expansión una vez que éstos extruyeron en la superficie.

Los materiales piroclásticos finos, como lapilli y ceniza volcánica, se transformaron en productos tobáceos parcial o totalmente bentonitizados. Se ubican en la parte Sur del yacimiento y están compuestos por fragmentos redondeados y subredondeados de dacitas, pómez y fragmentos líticos poligénicos, y pueden alcanzar los 30 centímetros. Se encuentran englobados en cenizas volcánicas de granulometría muy fina cinerítica. Poseen una clara estratificación gradacional que va desde fragmentos muy finos a más gruesos, cementados fuertemente por una amalgama de ceniza bentonitizada.



Figura N° 14: Depósitos de material lapillítico y ceniza volcánica, alternándose con piroclastos (a la izquierda) de dacitas y andesitas en un orificio de salida o pequeña chimenea, una de las formas de centros emisores que se encuentran en el flanco sur del yacimiento San José-Los Escullos (Fuente: Costafreda, J.L., 2011).

En la parte meridional del yacimiento alternan con piroclastos de composición dacítica y andesítica formando chimeneas de tamaños reducidos (ver figura 14).

ASPECTOS GENÉTICOS. CONCLUSIONES

La conformación de los terrenos volcánicos y volcanosedimentarios de la caldera de Los Frailes se caracteriza por un alto grado de permeabilidad, distinguido en sus dos formas principales: la presencia de rocas piroclásticas, brechas, conglomerados, material lapillítico poco cementado y la existencia de fallas, diaclasas y variadas formas de fracturas. El mayor efecto de las soluciones hidrotermales sobre estos sectores ha estado favorecido, precisamente, por su porosidad característica (Costafreda, J.L., 2008).

Dado que las soluciones hidrotermales que propiciaron la formación de mordenita en el yacimiento San José-Los Escullos afectaron por igual, aunque en un entorno geológico muy estrecho, tanto a las litologías más antiguas (dacitas, tobas e ignimbritas de composición dacíticas) como a las más recientes (andesitas piroxénicas), se deduce que su manifestación es posterior al emplazamiento de estas grandes formaciones. La energía térmica para activar estas soluciones pudo tener su origen en el desarrollo de los grandes sistemas geotérmicos del área de Rodalquilar, formados con posterioridad a la culminación del ciclo magmático, y provocado por el emplazamiento en profundidad de un magma diorítico, responsable de la efusión de las andesitas hornbléndicas, la manifestación de la mineralización aurífera de esta zona y el cambio morfológico de la parte central de la caldera de Rodalquilar (Arribas, A. 1992).

Posiblemente, la caldera de Los Frailes y sus alrededores sólo fueron afectados por una pequeña parte de esta energía, cuya mayor influencia se manifestó a través de conductos naturales en forma de fallas y conjunción de sistemas disyuntivos, como ocurre en el yacimiento San José-Los Escullos, donde se produce la intersección de una falla principal con dirección norte-noroeste con otra de dirección norte-sur.

El agua de mar o del manto freático se calentó por el efecto teletermal de los campos geotérmicos, ganando presión y movilidad, e irrumpió por zonas porosas existentes en las formaciones de tobas vítreas dacíticas e ignimbritas de igual composición, yacentes entre las andesitas piroxénicas y los domos dacíticos menos alterados. En su ascenso y movilidad interactuó con estas secuencias volcanosedimentarias, comúnmente ricas en vidrio volcánico, saturándose cada vez más en sodio y magnesio procedentes de la disolución y lixiviación del vidrio, de los feldespatos, piroxenos y anfíboles, al tiempo que experimentó un empobrecimiento en calcio y en hierro.

La solución también pudo sobresaturarse en iones de silicio y aluminio, que favoreció los procesos de reacción entre estos cationes con la posterior formación de fases arcillosas sumamente diluidas en solución (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L., 2010). Posteriormente, los productos precipitaron en forma de mordenita y minerales arcillosos de tipo esmectita. El pH de la solución debió oscilar entre 6 y 9, siendo prácticamente neutro, y la temperatura, en el momento de la formación de la mordenita, fluctuó entre los 150-200°C, bajo un régimen térmico prácticamente frío (Utada, M. 1997), que favoreció la deposición de una gama paragenética compuesta por clorita-epidota-carbonato. El predominio del agua, envolviendo fases silicatadas sódicas y potásicas, y en menor cuantía cálcicas, también fue un factor decisivo en el origen de zeolita hidratada del tipo mordenita.

Las reacciones de intercambio catiónico se caracterizaron por el reemplazo de los cationes divalentes de Ca^+ y Fe^+ por iones alcalinos de Na^+ y K^+ , así como alcalino-térreos de Mg^{2+} , influenciando drásticamente la composición química de la zeolita de San José-Los Escullos y sus rocas encajantes, estas últimas afectadas por el proceso de zeolitización. En la composición química de ambos materiales se observa una gran diferencia en las relaciones $(\text{Ca} + \text{Mg}) : (\text{Na} + \text{K})$ en comparación con las rocas encajantes menos alteradas.

La comparación entre las andesitas piroxénicas frescas del Cerro de Los Frailes (Arribas, A. 1992) con las rocas afectadas por el proceso de zeolitización (Costafreda, J.L., 2008) exhibe diferencias marcadas en cuanto a su composición química, donde estas últimas manifiestan un incremento sustancial del SiO_2 , Na_2O y K_2O , al tiempo que muestran un déficit importante en contenidos de CaO , MgO y Fe_2O_3 .

Asimismo, los contenidos en TiO_2 y P_2O_5 , muestran sensibles abatimientos en las rocas zeolíticas y demás formaciones afectadas hidrotermalmente; mientras que el MnO , por su carácter poco reactivo frente a las soluciones hidrotermales, se mantiene más o menos constante en ambas situaciones. Los contenidos en Cl, un tanto mayor en la zeolita y rocas alteradas hidrotermalmente que en las rocas originales, pudo haber sido propiciado por la existencia de una componente volátil producida en la solución hidrotermal.

En muchos procesos hidrotermales, con cantidades apreciables de zeolita como productos de reacción, a partir del efecto de los fluidos calientes sobre materiales volcánicos preexistentes, se menciona una alteración producida por soluciones ricas en fases clorurado-sódicas donde, inicialmente, se produce la disolución del vidrio volcánico y la cristalización de la fase cristobalita-ópalo, así como también minerales arcillosos a partir de soluciones con baja relación álcalis/ H^+ (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L., 2010). Con la disolución del vidrio se va verificando un aumento de esta relación y también en el pH de la solución, formándose zeolita con alta relación Si/Al, como es el caso de la mordenita del yacimiento San José-Los Escullos.

En la parte norte y norte-noroeste del yacimiento San José-Los Escullos, se produjo un particular enriquecimiento en mordenita y en la fase mordenita-esmectita (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L., 2010), en una zona de tobas vítreas e ignimbritas de composición dacítica que yace entre andesitas piroxénicas y domos dacíticos; este enriquecimiento pudo haberse producido por la diferencia entre los índices de permeabilidad litológica, siendo las tobas las de mayor permeabilidad.

Las andesitas y las dacitas, que actuaron como una gran barrera geoquímica natural, fueron también alteradas parcialmente, pero su temperatura más baja y la alta estabilidad de sus constituyentes minerales, provocó el enfriamiento de la disolución y con ello la remoción y precipitación de los productos disueltos y en suspensión en las partes periféricas de estas rocas. Es, precisamente, en estos puntos donde se localizan las muestras con mayor contenido en mordenita y con mayor arreglo cristalino.

Sin embargo, en las periferias distales las disoluciones debieron perder también su capacidad térmica y tomaron un carácter altamente alcalino, con lo cual se produjo un rápido equilibrio en la concentración. Esta puede ser la razón por la cual, en la medida en que aumenta la distancia las rocas poseen un grado de zeolitización menor.

El yacimiento San José-Los Escullos representa el punto de mayor concentración industrial de zeolita en todo el entorno conocido de la caldera de Los Frailes y sus alrededores, incluso de toda España. Los estudios realizados en áreas cercanas y distales no reflejan la presencia de yacimientos o indicios de zeolita con categoría económica.

La formación masiva de mordenita se produjo a lo largo de una falla de dirección norte-noroeste que atraviesa el yacimiento, y forma yacimientos en bolsones dispuestos a ambos lados del plano de falla; junto a estas zonas de enriquecimiento se desarrollan áreas de alteración hidrotermal con limonitización, carbonatación y cloritización que persisten a lo largo de esta fractura.

A causa de la alteración hidrotermal, los productos del reemplazo de minerales metálicos, tales como magnetita, ilmenita y titanomagnetita, pudieron originar la hematitización característica de algunos sectores del área de estudio. La alteración de los piroxenos, anfíboles, biotita y calcita, provocó la aparición de facies zonales con deposición de clorita, sílice, anhidrita, epidota, illita y plagioclasas albitizadas.

Las esmectitas se formaron, igualmente, por reemplazamiento hidrotermal del vidrio volcánico yacente en las tobas vítreas e ignimbritas de composición dacítica, provocado por soluciones con alto contenido inicial en Na_2O y MgO . La concentración en iones Na^+ favoreció la formación de mordenita, mientras que el alto contenido en Mg^{2+} originó la esmectita.

El proceso de alteración hidrotermal, con formación de mordenita y esmectita, fue un evento omnipresente en las zonas de calderas volcánicas del Sureste de España y en sus zonas aledañas; esto se demuestra en los trabajos de Martín Vivaldi *et al.* (1975) que señalan la presencia de mordenita en la zona de los Escullos, entre la caldera de Los Frailes y Rodalquilar; esta misma manifestación ha sido investigada posteriormente por Benito, R. *et al.* (1997) en un estudio detallado de una corta de bentonita ubicada entre Presillas Bajas, La Isleta del Moro y Los Escullos, donde la paragénesis mordenita-esmectita alcanza un contenido cercano al 80%.

BIBLIOGRAFÍA

- Arribas, A. (1992). Las mineralizaciones de metales preciosos de la Zona Central del Cabo de Gata (Almería) en el contexto metalogénico del Sureste de España. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. pp. 109-148 y 186-237.
- Benito, R., García, J. y Valle, F. (1997). Mineralogía y geoquímica del yacimiento de mordenita de Los Escullos (Cabo de Gata). Recursos y medioambiente en el sureste peninsular. pp. 291-306.
- Bordet, P. (1985). Le volcanisme miocène des Sierras de Gata et de Carboneras (Espagne du SudEst). Doc. Et Trav. IGAL, París. 8. p.
- Calvo, B., Costafreda, J. L. y Estévez, E. (2005). Caracterización preliminar de las zeolitas del yacimiento Los Murcianos, Almería. V Congreso Ibérico de Geoquímica, Soria 2005. 10 p.
- Castroviejo, R. (1999). Edificios volcánicos y estructuras de colapso en relación con las mineralizaciones auríferas de Rodalquilar: una nueva interpretación. Dpto. Ingeniería Geológica E.T.S.I. de Minas de Madrid. Apuntes de clases. 28 p.
- Costafreda, J.L. 2008. Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid: 515 p.
- Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra, J.L. (2010). Descripción de algunas zonas perspectivas para la explotación de bentonitas en el sureste de España. I Jornadas de Minería, Energía y Desarrollo. Río Turbio, Argentina. Págs. 10.
- Cunningham, C., Arribas, A. JR., Rytuba, J. y Arribas, A. (1990). Mineralized and unmineralized calderas in Spain. Part I: Evolution of the Los Frailes Caldera. Mineral Deposit. pp. 21-28.
- Fernández Soler, J. M. (1987). Análisis e interpretación de los materiales volcánicos del Cerro de Los Frailes (Cabo de Gata, Almería). Estudios Geológicos, 43. pp. 359-366.
- Fernández Soler, J. M. (1992). El volcanismo calco-alcalino de Cabo de Gata (Almería). Estudio volcanológico y petrológico. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 243 p.
- Fúster, J. M., Aguilar, M. J. y García, A. (1965). Las sucesiones volcánicas en la zona del Pozo de Los Frailes dentro del vulcanismo cenozoico del Cabo de Gata (Almería). Estudios Geológicos, 21. pp 199-222.
- Lodder, W. (1966). Gold-alunite deposits and zonal wallrock alteration near Rodalquilar, SE Spain. Veenanm & Zonen-Wageningen. 93 p.
- Mapa Geológico de España (1983). Escala 1:50.000. El Pozo de los Frailes. Instituto Geológico y Minero de España. Segunda Serie-Primera Edición. pp.1-35.
- Martín Vivaldi, J. L. y López, F. (1975). Presencia de mordenita en un yacimiento de bentonita de la región de Cabo de Gata (Almería). Boletín Geológico y Minero, 86. pp. 187-192.
- Rytuba, J., Arribas, A. JR., Cunningham, C., McKee, E., Podwysocki, M., Smith, J., Kelly, W. y Arribas, A. (1990). Mineralized and unmineralized calderas in Spain; Part II. Evolution of the Rodalquilar caldera complex and associates gold-alunite deposits. Mineral Deposit. pp. 529-535.
- Sánchez, V. (1968). Estudio petrológico de las sucesiones volcánicas del sector central de la formación del Cabo de Gata (Almería). Estudios Geológicos, 24. pp. 1-38.
- Utada, M. (1997). Zeolites in hydrothermally altered rocks and revised 2001. En: Natural zeolites: occurrence, properties, applications. pp. 305-322.